

Réserve utile et mesures d'humidité

Difficulté de calage des modèles de bilan hydrique

Les modèles classiques de simulation du bilan hydrique utilisent la notion de réserve utile (RU), fraction du stock d'eau du sol utilisable par la plante. Lorsque l'on veut comparer les résultats des simulations à des mesures d'humidité *in situ*, on rencontre deux problèmes. Quelle valeur de RU introduire dans le modèle ? Quelle fraction de la RU représente le profil d'humidité mesuré ?

Introduction

La réserve utile est définie comme le stock d'eau compris entre la capacité de rétention (CR) et le point de flétrissement (WP). Elle ne représente qu'une faible partie du stock d'eau total du sol (environ 20 % dans notre exemple). Les erreurs d'estimation de CR et WP peuvent induire une grande erreur relative sur l'estimation de la réserve utile. La CR est inférieure à la capacité de saturation (CS), humidité maximale d'un sol saturé d'eau, et sa détermination n'est pas aisée. Pour WP, on considère généralement que la plupart des plantes atteignent le flétrissement permanent lorsque le potentiel de l'eau dans le sol est de -16 bars ($pF = 4,2$). Mais l'humidité correspondante n'est pas mesurée *in situ*.

La mesure d'un profil d'humidité du sol permet de déterminer le stock d'eau. Pour raisonner en termes de

contenu de la RU, il faut pouvoir positionner ce profil par rapport à celui de CR et de WP. Il est en effet possible de mesurer des humidités supérieures à la CR. Ainsi, entre deux mesures, la variation de stock ne correspond pas à la variation de RU car une partie de l'eau est perdue par drainage gravitaire rapide. Il est également possible de mesurer *in situ* des humidités inférieures à celle déterminée en laboratoire à $pF = 4,2$. Il est donc nécessaire, pour caler des modèles, de déterminer *in situ* le profil de CR (méthode du drainage interne) et le profil d'humidité minimale.

Pour l'utilisation de modèles validés, sans comparaison avec des mesures, il suffit d'introduire dans le modèle la valeur correcte de la RU. Comment la déterminer ? La RU totale est la somme des RU de chaque couche de sol jusqu'à une profondeur au-delà de laquelle l'eau

J.-C. COMBRES, L. LE MEZO, M. METE,
B. BOURJON

Cirad,
BP 398 Montpellier Cedex 5, France
jean-claude.combres@cirad.fr



du sol n'est plus utilisable par les racines. Comment déterminer cette profondeur ? Cette notion de RU est tellement connue qu'il semble qu'il n'y ait aucun problème pour la déterminer. Pourtant, selon les méthodes et les hypothèses utilisées, on peut aboutir à des résultats très différents.

Sa détermination pose également des problèmes sur les sols caillouteux, avec des roches basaltiques poreuses et de répartition hétérogène. Dans ce cas, très fréquent sur les sols d'origine volcanique de l'île de la Réunion, les mesures d'humidité s'avèrent délicates ou impossibles. Des méthodes indirectes doivent être envisagées en utilisant la plante comme indicateur de satisfaction hydrique.

Les expérimentations conduites sur un sol ferrallitique à caractéristiques andiques de l'île de la Réunion illustrent ces difficultés.

Le contexte des essais

Le sol

Le sol ferrallitique brun rougeâtre développé sur basaltes (unité 45) est décrit par RAUNET (1991). Il est constitué de trois horizons :

- l'horizon de surface de 20 à 30 cm d'épaisseur est meuble, bien structuré, sans cailloux et à fort développement racinaire ;
- l'horizon suivant, de 30 à 100 cm d'épaisseur est de texture très argileuse, incluant quelques cailloutis très altérés. La cohésion est forte. Les racines sont encore abondantes ;
- en dessous, le long de fissures où l'eau circule bien, se trouvent des zones meubles où les racines peuvent encore pénétrer.

Du point de vue hydrique, LANGELLIER-BELLEVUE (1992) différencie sur le site de mesure à 250 m d'altitude :

- un horizon superficiel jusqu'à 80 cm, correspondant aux deux horizons précédents, où la circula-

tion de l'eau est plutôt rapide (comportement hydrodynamique typiquement ferrallitique) qui ne favorise pas le remplissage de la microporosité ;

- l'horizon inférieur ayant un fonctionnement hydrique influencé par le caractère andique de ces couches.

RAUNET et LANGELLIER-BELLEVUE ont déterminé une profondeur moyenne prospectable par les racines de 1,5 m et une RU correspondant à 130 mm.

Si ces sols s'assèchent, ils présentent un retrait important. Lors d'un passage à l'étuve à 105 °C pendant 48 heures, HUSSENET (1996) note une diminution de volume de l'ordre de 19 % sur les 80 premiers centimètres, 32 % au-delà.

Les sites et les dispositifs de mesure de la capacité de rétention

BOURON (1990) a déterminé les caractéristiques hydrodynamiques de ce sol sur une toposéquence allant de 150 m à 650 m d'altitude. Deux sites localisés à 150 et 300 m d'altitude sont voisins du site actuel (250 m). La méthode du drainage interne (double anneau) a été pratiquée avec un apport d'eau de 300 mm. Les mesures d'humidité étaient réalisées avec une sonde à neutrons (Solo 25) jusqu'à 1 m de profondeur sur un seul tube d'accès selon les procédures décrites par DANCETTE (1970).

Le site actuel est une parcelle de 0,8 ha plantée en canne à sucre (variété R570) à un écartement de 1,5 m, à 250 m d'altitude. Deux dispositifs de mesure d'humidité par réflectométrie temporelle (TDR) sont en place depuis février 1995 pour le premier, février 1996 pour le second. Le TDR utilisé (Trase system I, version 1800 de Soil Moisture) est connecté à un multiplexeur 6020 sur chaque site. Les capteurs sont 36 sondes enterrables à 3 brins (modèle GOE 6005 L 2). Sur chaque dispositif une fosse latérale a été ouverte (fosse 1, fosse 2). Les sondes

sont installées horizontalement dans le sol non remanié, et sous la ligne de cannes. Elles sont équidistantes de 20 cm sur les axes longitudinal et vertical (figure 1). Six sondes sont utilisées par niveau, sur 6 profondeurs de mesure de 20 à 120 cm. Les fosses d'accès ont été refermées aussitôt après l'installation. Trois années plus tard, il est peu probable que le remaniement du sol, en dehors de la zone de mesure, ait un impact significatif.

Les cinétiques de ressuyage par la méthode du drainage interne et du double anneau ont été effectuées à la récolte sur les deux dispositifs, sans destruction des souches, mais avec les précautions d'usage pour éviter toute évaporation de surface. Pour s'affranchir des difficultés de remplissage de la microporosité et du temps de gonflement du sol, un apport d'eau de longue durée, d'un montant supérieur à 4 000 mm a été pratiqué.

Pour calculer les humidités volumiques à partir des conductivités (K_a) mesurées TODOROFF (1993) a montré que l'étalonnage standard de TOPP *et al.* (1980) convenait bien pour les horizons de surface jusqu'à 70 cm. En revanche, il ne convenait pas pour les horizons profonds. L'étalonnage de TODOROFF et LANGELLIER (1998) est utilisé de 80 à 120 cm. On a donc les deux équations :

- équation 1 pour les horizons superficiels (0–70 cm),

$$H_v \% = 4,3 \cdot 10^{-4} \times K_a^3 - 5,5 \cdot 10^{-2} \times K_a^2 + 2,92 \times K_a - 5,3$$

- équation 2 pour les horizons profonds (70–120 cm),

$$H_v \% = 1,8 \cdot 10^{-3} \times K_a^3 - 1,57 \cdot 10^{-1} \times K_a^2 + 4,99 \times K_a - 9,6$$

avec H_v %, teneur en eau volumique ; K_a , constante diélectrique.

Le système de mesure est sensible à la température. Une formule a été établie pour corriger cette dérive thermique dans la gamme de 20 à 32 °C. L'ajustement est exponentiel.

La CR est déterminée par la méthode de MARCESSE (1967).

Les modes de calcul testés

Calcul des stocks à partir des humidités mesurées

Le stock d'eau S_z (en m^3) d'une couche de sol est le produit de son humidité volumique Hv_z (en m^3 d'eau/ m^3 de sol) par le volume considéré. Pour exprimer S_z en mm, on considère une surface de $1 m^2$ et l'on exprime l'épaisseur z en mm :

$$S_z \text{ (mm)} = Hv_z \text{ (m}^3/\text{m}^3) \times z \text{ (mm)}.$$

Si les mesures sont faites tous les 20 cm, on considère que la mesure est représentative d'une couche de 10 cm de part et d'autre du point de mesure. Pour la mesure la plus proche de la surface (ici à 20 cm de la surface), on considère généralement que la première couche a une épaisseur de 30 cm (BOURON 1990). Cette technique conduit à surestimer l'humidité de la couche 0 – 10 cm en phase d'assèchement, et à la sous-estimer en phase de réhumectation. Il est donc préférable d'estimer l'humidité de la couche 0 – 10 cm en extrapolant le gradient 20 – 40 cm à la cote 5 cm.

On calcule donc :

$Hv_5 = Hv_{20} - 0,75 \times (Hv_{40} - Hv_{20})$
alors $S_5 = Hv_5 \times 100$, et pour les autres couches $S_z = Hv_z \times 200$ avec Hv_z , humidité volumique au niveau z ; S_z , stock d'eau sur la tranche de sol z centrée sur le niveau z .

Détermination des valeurs d'humidité maximale et minimale en conditions naturelles

La parcelle a été conduite sous des régimes hydriques variés relevant d'autres expérimentations. Plusieurs cinétiques d'assèchement intense ont pu être suivies sans toutefois atteindre la mortalité de la culture. On dispose donc des humidités maximales et minimales observées pour chaque couche, ainsi que des stocks maximal et minimal sur 130 cm. Les humidités extrêmes sont observées à des dates qui diffèrent pour chaque couche. Les stocks maximal et minimal sont donc légèrement différents des stocks calculés à partir des humidités maximales et minimales par couche.

Méthodes de calcul de la RU

Les résultats de plusieurs approches sont comparés.

La méthode de laboratoire

Des échantillons de sol sont prélevés par la méthode des cylindres à 20, 50 et 100 cm. Les pF à 5 cm sont extrapolés, comme les humidités mesurées *in situ*, pour permettre les comparaisons. Les humidités des échantillons sont mesurées en laboratoire à différents pF. Le pF, logarithme de la pression appliquée pour extraire l'eau, représente le logarithme du potentiel de l'eau. On établit ainsi la courbe potentiel = f(humidité). A quel pF, l'humidité est-elle caractéristique de la CR *in situ* ? Un choix inadéquat biaise l'estimation de la RU. De nombreux travaux portent sur ce thème, ce pF varie selon les sols, et l'on retient en moyenne pF = 2,5. Pour ce sol, à partir de mesures *in situ* antérieures, JOUVE (1984) et BOURON (1990) trouvent respectivement pF = 1,8 et pF = 1,7. La valeur 1,8 a été retenue pour minimiser les erreurs. On a pour chaque couche :

$$RU_z = (Hv \times (pF = 1,8) - Hv \times (pF = 4,2)) \times z.$$

La méthode des humidités minimales et maximales par couche

Pour s'affranchir du problème de la CR et des écarts entre les mesures *in situ* et en laboratoire, on utilise les humidités maximales et minimales mesurées par couche. On a alors :

$$RU_z = (Hv_z \text{ max} - Hv_z \text{ min}) \times z.$$

Les méthodes mixtes

Les méthodes mixtes consistent à prendre indifféremment des humidités mesurées *in situ* et en laboratoire.

La méthode globale

Proposée par VAKSMAN (1987), la méthode globale consiste à ne plus raisonner par couche mais sur l'ensemble du profil. Le stock d'eau est mesuré sur une profondeur suffi-

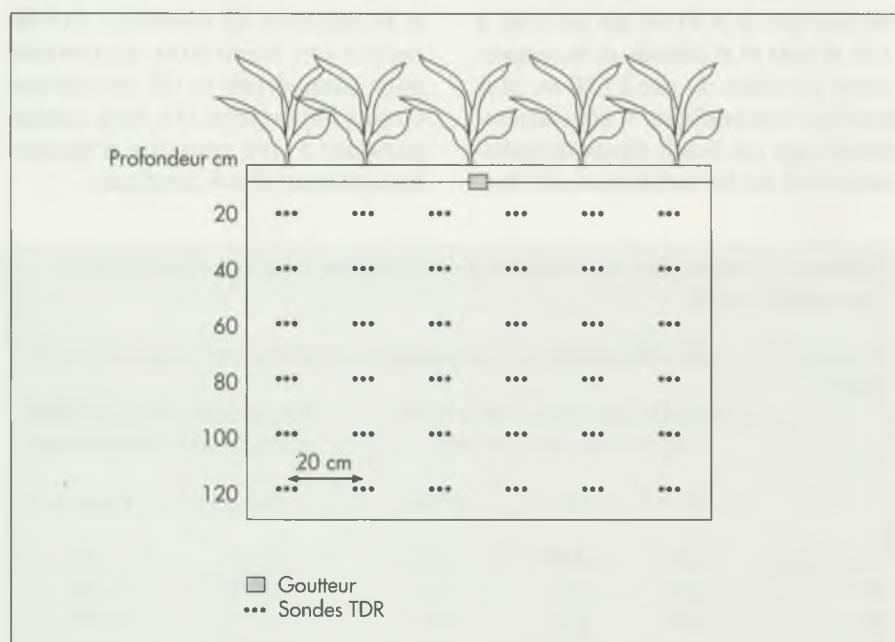


Figure 1. Mise en place des sondes pour la mesure de l'humidité par la méthode de réflectométrie temporelle (TDR), sous culture de canne à sucre.



sante pour que l'humidité en profondeur varie peu au cours du temps. La RU est la différence entre le stock à la CR et le stock minimal observé.

La profondeur d'enracinement à retenir

A l'exception de la méthode globale, la profondeur de sol à prendre en compte est fondée sur la profondeur d'enracinement de la culture. Quelle profondeur prendre en compte ? CHOPART (1985), CHOPART et VAUCLIN (1990), CHOPART et MARION (1994) préconisent de fixer le front racinaire à la profondeur de la dernière racine visible. On utilise parfois une notion plus vague, la profondeur à partir de laquelle on observe moins de 5 à 10 % de racines. Des profils racinaires ont été déterminés sur le site par HUSSENET (1996), et répétés ultérieurement, par la méthode de la grille de maille 10 x 10 cm. Au-delà de 80 cm (horizon de type andique) on a observé un seul impact de racine à 100 cm. Selon les méthodes, on devrait retenir 80 ou 100 cm. Les deux hypothèses retenues sont 90 cm et 130 cm (ensemble du profil).

Résultats

Cinétiques de ressuyage par drainage interne

En analysant l'évolution temporelle du logarithme népérien de l'humidité MARCESSE (1967) met en évidence deux phases : une cinétique rapide de drainage gravitaire, et une cinétique linéaire lente ne faisant intervenir que les forces capillaires. La première phase est très rapide dans ce sol (moins de 15 h) comme l'avait montré LANGELLIER-BELLEVUE (1992). Dans la phase linéaire la régression $\ln(H_v) = at + b$, a été établie pour chaque couche. L'exponentielle de l'ordonnée à l'origine donne l'humidité à la CR.

La capacité au champ

La capacité au champ (CC), notion agronomique, est classiquement définie comme l'humidité d'un sol ressuyé, 48 heures après des pluies saturantes. Dans le cas de ce sol à ressuyage extrêmement rapide (figure 2), l'humidité à 48 heures est très éloignée de la CR. C'est pourquoi nous proposons de définir la CC comme l'humidité à partir de laquelle l'évolution devient log-linéaire, son évolution ne faisant plus appel aux forces gravitaires.

Elle est déterminée à partir de l'analyse des résidus entre la droite de régression $\ln(H_v) = f(t)$ et $\ln(H_v)$ mesurée. Elle est très proche de la CR, pour ce type de sol.

Les effets des techniques de mesure

On constate (figure 2) un comportement fortement différencié des trois premières couches ferrallitiques de 20 à 60 cm. Pour les couches 80, 100, et 120 cm les humidités sont quasiment identiques, et l'écart entre la capacité de saturation et la capacité de rétention est très faible. Les CR obtenues (tableau 1) sont voisines sur les deux fosses de mesure, mais systématiquement plus faibles sur la fosse 2. Elles diffèrent sensiblement de celles déterminées par BOURON sur ses sites à 150 et 300 m d'altitude et se rapprochent de celles du site à 650 m, plus franchement andique. Il est vraisemblable que ces écarts reposent essentiellement sur les techniques utilisées.

Avec la sonde à neutrons, les étalonnages in situ sont peu précis, d'une part à cause de la densité, d'autre part à cause de la représentativité des cylindres prélevés par rapport à la sphère d'influence de la sonde. Enfin, les faibles variations d'humidité lors de l'étalonnage induisent des erreurs liées à la régression ; ceci rend les étalonnages peu fiables pour les horizons profonds (BOURON, 1990). De plus, il est probable que sur ce type de sol, un apport de 300 mm soit insuffisant pour saturer la microporosité.

Les humidités caractéristiques

L'écart entre la CS et la CR (tableau 2) décroît avec la profondeur. Il représente, pour tout le profil, un écart de stocks de 64 mm (50 % environ de la RU).

Les humidités maximales mesurées in situ sont supérieures à la CR. L'écart décroît également avec la profondeur et représente 35 mm (27 % de la RU) sur l'ensemble du profil.

Avec une irrigation goutte à goutte quotidienne, les mesures automatisées peuvent exceptionnellement se produire dans des conditions transitoires d'excès d'eau (pendant l'irrigation), et fournir des valeurs comprises entre la capacité de saturation et la capacité de rétention. Si l'on retient ces humidités maximales pour caractériser la CR, on fait des erreurs importantes (35 mm), correspondant à une semaine d'évapotranspiration (4 à 6 mm/jour).

Tableau 1. Comparaison des capacités de rétention sur cinq sites classés dans la même unité de sol.

Profondeur (cm)	Humidité volumique à la capacité de rétention (m^3 d'eau/ m^3 de sol)				
	Parcelles étudiées par BOURON en fonction de l'altitude			Parcelles étudiées par TDR (réflectométrie temporelle)	
	150 m	300 m	650 m	Fosse 1	Fosse 2
20	0,39	0,40	0,48	0,444	0,422
40	0,41	0,42	0,47	0,478	0,493
60	0,42	0,44	0,53	0,515	0,499
80	0,43	0,47	0,56	0,554	0,53
100	0,43	0,46	0,56	0,557	0,53
120	-	-	-	0,551	0,529

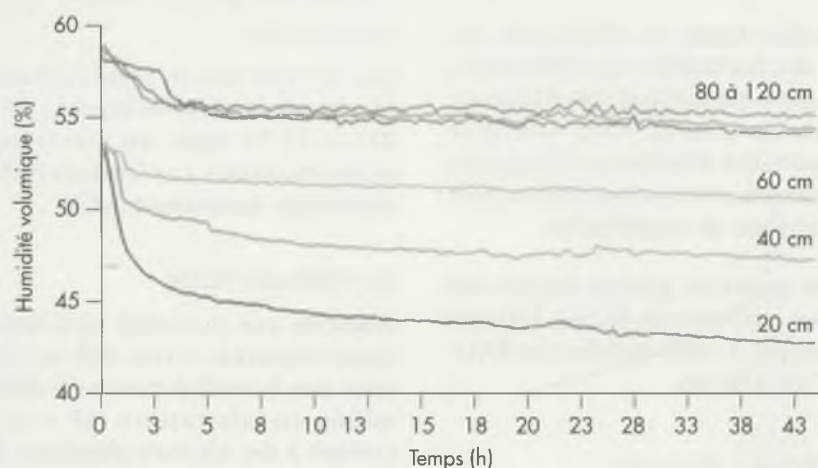


Figure 2a

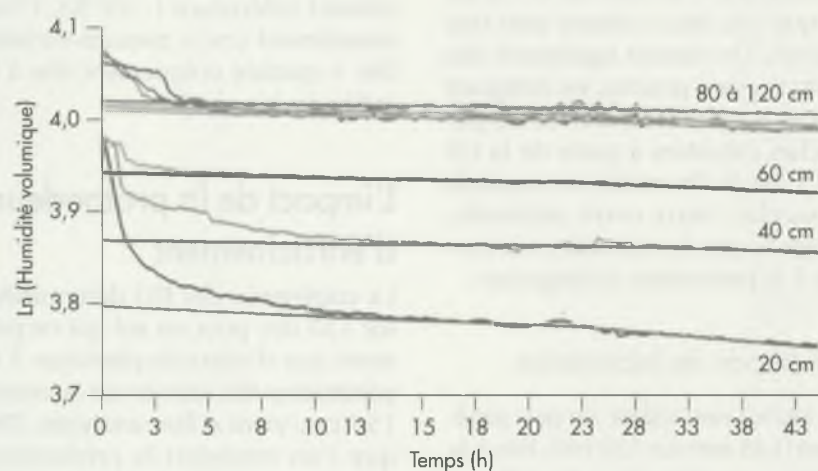


Figure 2b

L'humidité à $pF = 1,8$ surestime légèrement l'humidité à la CR de façon plus marquée en surface. L'écart est de 24 mm (18 % de la RU). On aurait pu choisir un seuil de pF un peu plus élevé (1,9 ou 2) et des seuils différents pour chaque couche. Mais en fonction de quoi les déterminer ?

Les humidités minimales mesurées de 20 à 60 cm sont inférieures à celles mesurées en laboratoire à $pF = 4,2$. Au-delà de cette profondeur, c'est l'inverse. De ce fait l'écart sur le profil n'est que de 12 mm (9 % de la RU). Ce phénomène est bien connu en surface et décrit par ALLEN et al. (1998) pour les 10 à 15 premiers centimètres (séchage à l'air libre). Mais un tel écart sur 60 cm doit avoir une autre origine. BOURON (1990) a montré le décalage existant entre les courbes liant le pF et l'humidité obtenues in situ et en laboratoire. Pour les faibles pF , il peut aller jusqu'à 10 % d'humidité volumique. On ne possède pas de mesures in situ à des pF élevés. Il est

Figure 2. Evolution de l'humidité à différentes profondeurs : cinétique de ressuyage.

2a. Suivi exprimé en % d'humidité en fonction du temps (heures).

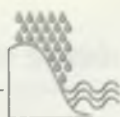
2b. Suivi exprimé en $\ln(\text{humidité})$ en fonction du temps (heures).

Tableau 2. Humidités mesurées sur les deux emplacements du site expérimental. Les humidités à CS, CR, CC sont mesurées lors des cinétiques de ressuyage. Les humidités maximales et minimales sont mesurées en conditions naturelles, celles à $pF = 1,8$ et à $pF = 4,2$ sont obtenues en laboratoire.

Profondeur (cm)	Fosse 1							Fosse 2				
	CS	Max	$pF\ 1,8$	CR	CC	$pF\ 4,2$	Min	CS	Max	CR	CC	Min
5	0,531	0,463	0,485	0,419	0,410	0,354	0,219	0,524	0,485	0,369	0,361	0,152
20	0,533	0,480	0,491	0,444	0,438	0,365	0,285	0,531	0,486	0,422	0,415	0,251
40	0,536	0,511	0,499	0,478	0,475	0,380	0,369	0,541	0,515	0,493	0,487	0,382
60	0,534	0,530	0,499	0,515	0,511	0,429	0,422	0,539	0,511	0,499	0,495	0,41
80	0,587	0,578	0,565	0,554	0,553	0,446	0,476	0,631	0,541	0,530	0,526	0,468
100	0,587	0,584	0,565	0,557	0,556	0,446	0,483	0,595	0,545	0,530	0,526	0,465
120	0,587	0,568	0,565	0,551	0,55	0,446	0,485	0,582	0,568	0,529	0,525	0,477
Stock (mm)												
0-130	726	697	686	662	658	538	526	736	682	638	631	506

La valeur à 5 cm est calculée, les autres sont mesurées. La précision est de $0,01\ m^3\ d'eau/m^3\ de\ sol$.

Les humidités sont exprimées en $m^3\ d'eau/m^3\ de\ sol$.



vraisemblable qu'un écart persiste, ce qui expliquerait les divergences.

Conséquences sur l'estimation de la réserve utile

Il faut être très vigilant sur la méthode de détermination de la RU. Selon les seuils d'humidité maximale et minimale choisis pour le calcul de la RU, et selon les profondeurs d'enracinement retenues, on obtient des valeurs différentes (tableau 3). Les différentes hypothèses sont *a priori* logiques, et ne paraissent pas aberrantes. Pourtant dans la pratique, elles conduisent à des résultats très contrastés allant de 61 à 176 mm selon les modalités retenues.

La RU obtenue selon les différentes approches

La méthode globale

Proposée par VAKSMANN, la méthode globale quantifie bien la part complète du stock qui a contribué à l'évapotranspiration. On pourrait craindre qu'elle minore la véritable RU. Un stress hydrique plus intense aurait pu abaisser le stock minimal de quelques millimètres, guère plus compte tenu du stress subi. Mais cette méthode ne peut en aucun cas surestimer la RU. Elle est insensible à la profondeur choisie

dès que le niveau bas de mesure est suffisamment profond.

Les deux fosses du même site, qui ont des humidités très différentes, ont, par cette méthode des RU quasiment identiques. Ceci souligne l'importance d'étalonner chaque site de mesure avant de les utiliser pour des travaux de modélisation.

Cette approche globale fournit une valeur moyenne de RU de 130 mm identique à celle établie par RAUNET sur 150 cm.

Méthodes donnant des résultats similaires

On obtient des résultats similaires en utilisant la CC au lieu de la CR du fait que ces deux valeurs sont très voisines. On obtient également des résultats assez proches en intégrant sur tout le profil (130 cm) les RU par couches calculées à partir de la CR (ou CC) et de l'humidité minimale de la couche. Mais cette méthode, comme toutes les suivantes, est sensible à la profondeur d'intégration.

La méthode de laboratoire

Elle fournit une valeur un peu supérieure (148 mm sur 130 cm), liée à la légère surestimation de CR par $pF = 1,8$. Mais cette relative précision n'a pu être obtenue que grâce à des cinétiques de ressuyage et des mesures de pF antérieures qui ont permis de choisir $pF = 1,8$. Avec $pF = 2,5$, la RU aurait été sous-estimée.

La méthode des humidités maximales et minimales par couche

Sur ce type de sol, cette méthode fournit une forte surestimation de la RU (+ 33 %) dans nos conditions expérimentales car les humidités maximales surestiment la CR.

La méthode mixte

Associer une humidité caractéristique mesurée *in situ* (CR ou CC) avec une humidité minimale déterminée en laboratoire ($pF = 4,2$) conduit à des résultats aléatoires. La RU est du même ordre de grandeur, légèrement inférieure, à celle de la méthode globale sur la fosse 1. En revanche, sur la fosse 2 elle est nettement inférieure (- 30 %). C'est assurément une « pseudo-variabilité » spatiale uniquement liée à la méthode de calcul.

L'impact de la profondeur d'enracinement

La cohérence des RU déterminées sur 130 cm, pour un sol qui ne présente pas d'obstacle physique à la pénétration des racines sur au moins 150 cm, vient d'être analysée. Dès que l'on introduit la profondeur d'enracinement, la RU est fortement sous-estimée par rapport à la méthode globale. Les écarts relatifs entre les méthodes sont accentués. On obtient ainsi avec la méthode mixte sur la fosse 2 une valeur de RU inférieure de moitié.

Pourquoi l'introduction de la profondeur d'enracinement observée *in situ* conduit-elle à une sous-estimation de la RU ? D'une part, l'estimation de la densité racinaire sur un plan ne fournit pas obligatoirement une bonne image de la répartition volumique des racines aux faibles densités. D'autre part, la notion de RU est une simplification relative à un fonctionnement global. Si l'on veut prendre en compte la répartition racinaire, il faudrait intégrer les mécanismes complexes de transfert d'eau des zones non prospectées par les racines vers ces dernières, et des

Tableau 3. Valeur de la RU selon le mode de calcul pour deux profondeurs d'enracinement.

Mode de calcul Hv à $pF = 1,8$ – Hv à $pF = 4,2$	RU sur 130 cm 148 mm		RU sur 90 cm 100 mm	
	Fosse 1	Fosse 2	Fosse 1	Fosse 2
Stock CR – stock min	134	131		
Stock CC – stock min	130	125		
Hv à CR – Hv min	136	132	108	108
Hv à CC – Hv min	132	125	104	103
Hv max – Hv min	171	176	134	142
Hv à CR – Hv à $pF = 4,2$	124	100	81	67
Hv à CC – Hv à $pF = 4,2$	120	93	77	61

Mesure de la transpiration d'un couvert de canne à sucre

FERRAND (1991) a utilisé la méthode de mesure des flux de sève par bilan d'énergie (Dynamax Inc.) pour mesurer la transpiration d'un couvert de cannes à sucre. Six capteurs SGB 32 sont utilisés. La parcelle était en 5^e repousse de 9 mois, variété R570, assurant une pleine couverture. A ce stade la contribution de l'évaporation du sol dans l'évapotranspiration est négligeable. Le sol est un sol brun sur coulée de la phase IV de la Fournaise sans recouvrement pyroclastique, unité 50, et cartographié comme peu profond (50 cm) à fortes pierrosité et hétérogénéité spatiale. RU = 50 mm.

La transpiration (TR) ainsi mesurée est rapportée à l'évapotranspiration de référence (ET_0). Ce rapport est suivi au cours d'une cinétique d'assèchement de la parcelle. Elle a été préalablement irriguée en excès pour s'assurer qu'au temps t_0 de la cinétique, l'eau n'était pas un facteur limitant.

Tant qu'il y a de l'eau dans la réserve facilement utilisable (RFU), le rapport TR / ET_0 reste voisin de 1. Ensuite, il décroît et est proportionnel au contenu relatif de la réserve difficilement utilisable (RDU). La cinétique a été perturbée par deux pluies le 30^e jour (30 mm) et le 42^e jour (10 mm). Le contenu de la RU a été simulé avec IRRICANNE (COMBRES et KAMIENIARZ, 1992) pour différentes valeurs de RU en supposant que pour ce sol $RFU/RU = 0,5$. On constate (figure 3) :

– que TR / ET_0 reste voisin de 1 jusqu'à une évaporation cumulée de 100 mm. Donc $RFU = 100$ mm ;

– que la relation est moins nette pour la réserve difficilement utilisable, vraisemblablement du fait des phénomènes d'hystérésis ;

– la valeur anormale de 1,2 correspond à une journée de pluie où ET_0 est faible et où les erreurs de mesure sont plus grandes.

On a donc une RU de 200 mm si l'on considère que $RFU = 0,5$ RU, ou de 150 mm si l'on prend $RFU = 2/3$ RU. La RU est donc 3 à 4 fois supérieure à celle estimée en pédologie.

Faisant appel à une pelle mécanique brise-roche on a pu constater :

– que les racines de canne traversent les blocs de basalte ;
– qu'à 180 cm de profondeur (limite de la pelle utilisée) les racines cordon étaient encore très nombreuses.

Les valeurs déterminées sont en concordance avec les observations racinaires. Auparavant on n'imaginait pas que les racines de canne puissent traverser les 30 cm de basalte.

Cette approche indirecte peut être envisagée lorsque les mesures d'humidité du sol ne sont pas réalisables. La RU ainsi déterminée est suffisante pour les simulations et le pilotage de l'irrigation. Mais l'hétérogénéité spatiale peut être un handicap qui nécessite plusieurs répétitions. Or, la méthode est lourde sur le plan instrumental et sur celui du traitement. Elle nécessite, comme la méthode de VAKSMANN, de longues périodes sans pluies (2 mois) pour atteindre un niveau d'assèchement suffisant.

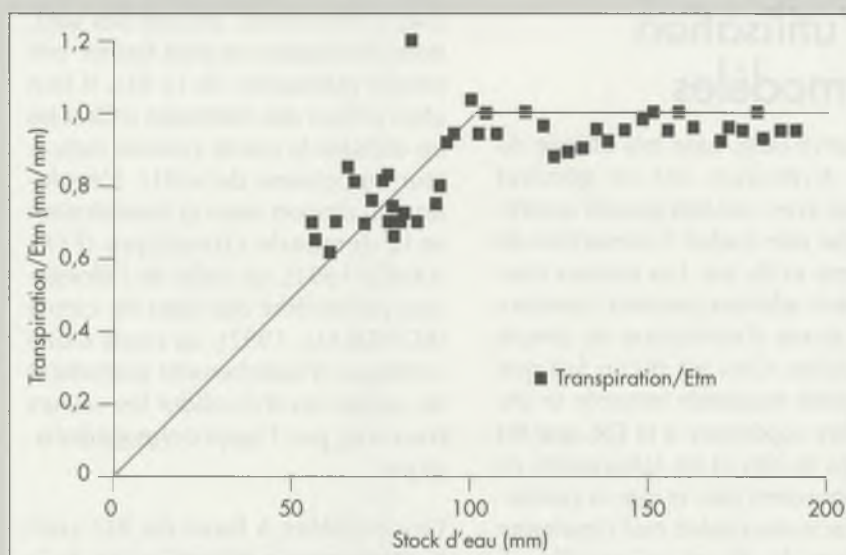
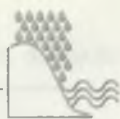


Figure 3. Evolution du ratio Transpiration / ETm en fonction du stock d'eau (mm).



remontées capillaires des zones sous-jacentes. Ces mécanismes ne sont pas intégrés dans les modèles classiques de bilan hydrique basés sur la RU. Un modèle de transfert multi-couches serait nécessaire. Rechercher une précision en introduisant la mesure du front racinaire, peut conduire à des erreurs importantes, tout au moins dans ce type de sol.

Toutefois il est évident que des cultures à enracinement superficiel explorent une RU plus faible qu'une culture à enracinement profond. Quelle profondeur choisir pour déterminer la RU ? La profondeur à considérer est limitée soit par la profondeur du sol, soit par la profondeur de la zone d'influence des racines. L'observation des profils racinaires conduit à sous-estimer la profondeur utile pour la RU. Il convient de rechercher la profondeur de la dernière racine visible et la majorer de 20 à 40 cm, du moins dans notre exemple. Cette majoration, vraisemblablement liée aux remontées capillaires doit varier selon le type de sol. Il reste donc une marge d'incertitude pour l'utilisation des modèles courants basés sur la RU. Elle explique certainement les écarts fréquemment observés dans la bibliographie, entre valeurs mesurées et valeurs simulées par ces modèles.

Conséquences pour le calage et l'utilisation de modèles

La réserve utile, base très utilisée du bilan hydrique, est en général connue avec une très grande incertitude car elle traduit l'interaction de la plante et du sol. Les notions couramment admises peuvent conduire à des écarts d'estimation du simple au double. Ceci est dû au fait que l'humidité maximale mesurée in situ peut être supérieure à la CR, que les minima in situ et en laboratoire ne correspondent pas, et que la profondeur racinaire traduit mal l'épaisseur de la couche de sol qui contribue à l'évapotranspiration.

Le calage de modèles de bilan hydrique à pas de temps journalier nécessite un étalonnage préalable des sites de mesure. La détermination des CR par couche, par la méthode du drainage interne, et celle des humidités minimales observables après une longue phase de stress, sont incontournables. Il est recommandé d'utiliser des profondeurs de mesures légèrement excessives pour ne pas biaiser l'étalonnage. La RU est la différence entre le stock à la CR et le stock minimal observé.

Lors des mesures de suivi pour calage, l'humidité maximale est bornée à la capacité de rétention. Le contenu de la RU est l'écart entre le stock calculé à partir des humidités mesurées (éventuellement bornées) et le stock minimal.

Lorsqu'il s'agit d'utiliser des modèles sans les comparer à des mesures (par exemple pour piloter l'irrigation), il faut, à l'inverse, introduire une valeur de RU dans le modèle. Une marge d'erreur un peu plus élevée (de 15 à 20 %) est acceptable. L'idéal est de disposer d'un site où la RU a été étalonnée pour la culture. L'approche de laboratoire peut être suffisante si la profondeur utile n'est pas sous-estimée. L'observation de la plante (RONDEAU, 1992) permet de vérifier si le calage est correct.

Dans les cas critiques où le taux de roches et leur contribution sont difficiles à déterminer, aucune des solutions envisagées ne peut fournir une bonne estimation de la RU. Il faut alors utiliser des méthodes indirectes en utilisant la plante comme indicateur du contenu de la RU. L'évolution du rapport entre la transpiration et la demande climatique (FERRAND, 1991), ou celle de l'élongation journalière des tiges de canne (RONDEAU, 1992), au cours d'une cinétique d'assèchement permettent de valider ou d'invalidier les valeurs fournies par l'approche pédologique.

Les modèles à base de RU sont simples, mais la détermination de la RU l'est moins.

Bibliographie

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper n° 56, 300 p.

BOURON B., 1990. Caractérisation hydrodynamique des sols d'une toposéquence. Mémoire, Ensam Montpellier, France, 57 p.

CHOPART J.-L., 1985. Développement racinaire de quelques espèces annuelles cultivées en Afrique de l'Ouest et résistance à la sécheresse. In La Sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée, CILF édit. Paris. p. 145-154.

CHOPART J.-L., VAUCLIN M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 54 (5) : 1 377-1 384.

CHOPART J.-L., MARION D., 1994. Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. Note n° 7/94 RD Idessa Bouaké, Côte d'Ivoire, 28 p.

COMBRES J.C., KAMIENIARZ, 1992. Un logiciel multiparcelles et multiutilisateurs d'avertissement d'irrigation et de gestion des périmètres irrigués. ICID Bulletin 41 (2) : 135-152.

DANCETTE C., 1970. Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. Intérêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide. L'Agron. Trop. 25 (3) : 225-240.

FEODOROFF A., 1962. Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. Ann. agronomiques 13 (6) : 523-547.

FERRAND P., 1991. Mesure de l'évapotranspiration d'un couvert de canne à sucre par la méthode des débits de sève. Méthodologie et applications. Mémoire ISTOM, France 95 p.

HUSSENET J.-P., 1996. Contribution à la modélisation de l'évapotranspiration maximale de la canne à sucre. (stade culture couvrante). Mémoire Ina-pg, université Paris VI - ENS, France. 50 p.

JOUBE S., 1984. Caractéristiques hydriques et hydrodynamiques de deux types de sol : andosol et sol brun à caractère andique. Rapport, Irat Réunion. 111 p.

LANGELLIER-BELLEVUE P., 1992. Périmètre du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine. Partie II. Les caractéristiques hydrodynamiques des sols. Définition de leurs aptitudes à l'irrigation. Cirad-Irat, la Réunion, 27 p.

MARCESSE J., 1967. Détermination in situ de la capacité de rétention d'un sol au moyen d'un humidimètre à neutrons. In Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, IAEA-SM-94/14, p. 137-145

(compte-rendu du colloque d'Istanbul), Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche.

RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. Cirad, France. 438 p.

RONDEAU P., 1992. Le conseil personnalisé à l'irrigation IRRICANNE: Mise en place, Evaluation, Perspectives d'avenir. Mémoire ESA, France. 55 p. + annexes.

TODOROFF P., 1993. Adaptation méthodologique d'une sonde réflectométrique pour la mesure de l'humidité des sols. Application aux sols de la Réunion. Nouvelles perspectives. Mémoire, Ensam Montpellier, France. 58 p.

TODOROFF P., LANGELLIER-BELLEVUE P., 1998. Comparison of empirical and partly deterministic methods of time domain reflectometry calibration, based on a study of two tropical soils, *Soil and Tillage Res.* 45 (3-4) : 325-340.

TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research* 16 (3) : 574-582.

VAKSMANN M., 1987. Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat, USTL, Montpellier, France 170 p.

Résumé...Abstract...Resumen

J.-C. COMBRES, L. LE MEZO, B. BOURON, M. METE —
Réserve utile et mesures d'humidité. Difficultés de calage des modèles de bilan hydrique.

La réserve utile d'un sol cultivé en canne à sucre est évaluée selon les diverses méthodes couramment utilisées, qui peuvent conduire à de fortes divergences. Des essais ont permis d'établir des cinétiques de ressuyage, avec suivi de l'humidité du sol par réflectométrie temporelle, pour accéder à la capacité de rétention. Des mesures d'humidité du sol tout au long de plusieurs cycles de culture, incluant de forts stress hydriques, fournissent les humidités maximale et minimale observées par couche et les stocks hydriques maximal et minimal sur l'ensemble du profil. Des prélèvements au cylindre ont été réalisés pour déterminer en laboratoire les humidités à différents pF (allant de pF = 1,8 à pF = 4,2. Le ressuyage rapide, le faible pF (1,8) et les fortes humidités volumiques (44 % à 20 cm, 55 % à 120 cm) associés à la capacité de rétention s'expliquent par le caractère andique du sol ferrallitique. La profondeur d'enracinement à considérer, qui est la source des plus grandes erreurs, est discutée. En conclusion, il est préconisé de prendre pour réserve utile la différence entre les stocks d'eau à la capacité de rétention et le stock minimal observé sur une profondeur excédant, de 20 à 30 cm, la profondeur racinaire maximale. Des méthodes alternatives, comme la mesure de l'évapotranspiration par flux de sève, peuvent fournir de bonnes estimations pour les sols rocheux, où les méthodes classiques donnent des résultats plus incertains.

Mots-clés : réserve utile, capacité de rétention, Réunion, *Saccharum*, réflectométrie temporelle.

J.-C. COMBRES, L. LE MEZO, B. BOURON, M. METE —
Available reserve and moisture measurement. Difficulties of calibrating waterbalance models.

The available reserve of soils planted with sugarcane is evaluated by several commonly used methods, which can produce very diverging results. Trials established drying kinetics, and soil moisture content was monitored by time domain reflectometry, with a view to determining the retention capacity. Soil moisture measurements over several crop cycles, including periods of severe water stress, provided values for maximum and minimum moisture content per layer and maximum and minimum water reserves for the profile as a whole. Core samples were taken for laboratory determination of moisture contents at pF 1.8 and 4.2. The rapid drying, low pF (1.8) and high moisture contents (44% at 20 cm, 55% at 120 cm) associated with the retention capacity could be attributed to the andic nature of the ferrallitic soil. The rooting depth to be considered, which is the source of greatest error, is discussed. In conclusion, the authors recommend taking as the available reserve the difference between water reserves at retention capacity and the minimum reserve observed over a depth of 20 to 30 cm more than maximum root depth. Alternative methods, such as measuring transpiration by sap flow, can provide good estimates for rocky soils, for which conventional methods are less reliable.

Keywords: available reserve, retention capacity, Réunion, *Saccharum*, time domain reflectometry

J.-C. COMBRES, L. LE MEZO, B. BOURON, M. METE —
Reserva útil y mediciones de la humedad. Dificultades de la fijación de modelos de balance hídrico.

La reserva útil de un suelo cultivado con caña de azúcar se evalúa según los distintos métodos corrientemente empleados que pueden llevar a importantes divergencias. Gracias a unos ensayos se han podido establecer unas cinéticas de secado, con seguimiento de la humedad del suelo por reflectometría temporal, para acceder a la capacidad de retención. Las medidas de humedad del suelo durante varios ciclos de cultivo, incluyendo importantes estrés hídricos, proporcionan las humedades máxima y mínima observadas por capa y las reservas hídricas máximas y mínimas sobre el conjunto del perfil. Se tomaron muestras con cilindro para determinar en el laboratorio las humedades en pF 1,8 y 4,2. El secado rápido, el bajo pF (1,8) y las altas humedades volumétricas (44% a 20 cm, 55% a 120 cm) asociadas a la capacidad de retención se explican por el carácter ándico del latisol. Se discute la profundidad de enraizamiento considerada como origen de los mayores errores. En conclusión, se recomienda tomar como reserva útil la diferencia entre las reservas de agua en capacidad de retención y la reserva mínima observada en una profundidad que supere, de 20 a 30 cm, la profundidad radicular máxima. Métodos alternativos, como la medida de la evapotranspiración por flujo de savia, pueden proporcionar buenas estimaciones en suelos rocosos, en los que los métodos clásicos ofrecen resultados más inciertos.

Palabras clave: reserva útil, capacidad de retención, Reunión, *Saccharum*, reflectometría temporal.